

AI를 활용해 양자 회로 튜닝의 시행착오를 줄이는 연구

(2026.08.11., 양자정보연구지원센터)

□ AI 활용 양자 회로 튜닝의 시행착오 줄이는 연구

- 텍사스 A&M대, NVIDIA, 로스앨러모스 국립연구소 공동 연구진이 양자 알고리즘의 최적 설정을 문제의 구조적 특성으로 예측할 수 있도록 지원하는 AI 기반 프레임워크 ‘SCALAR(Symbolic Conjecture and LLM-Assisted Reasoning)’ 개발(arXiv에 사전 공개)
 - SCALAR는 양자회로 시뮬레이션, 자동화된 수학적 추측 생성, 대규모 언어모델(LLM)을 결합해 양자회로의 동작 특성에서 반복적으로 나타나는 패턴을 탐색
 - 양자 알고리즘을 실제 양자 하드웨어에서 반복적으로 실행하며 매개변수를 조정하는 시행착오를 줄이고, 제한적인 양자컴퓨팅 자원의 활용 효율을 높이는 것이 주요 목적
- QAOA 최적 매개변수 예측에 초점
 - 대표적인 변분 양자 알고리즘인 “QAOA(Quantum Approximate Optimization Algorithm)”를 대상으로 SCALAR의 가능성을 검증
 - QAOA는 양자컴퓨터가 후보 해를 생성하고, 고전 컴퓨터가 회로의 매개변수를 반복적으로 조정해 최적의 해를 찾는 양자-고전 하이브리드 알고리즘
 - 문제 규모가 커질수록 최적 매개변수를 찾기 위해 양자회로를 반복 실행해야 하며, 실제 양자 하드웨어에서는 각 실행마다 많은 측정이 필요해 상당한 비용과 시간이 발생
 - 연구진은 문제를 나타내는 그래프의 구조적 특성과 QAOA의 최적 매개변수 사이에 일정한 관계가 존재하는지 분석
- MaxCut 문제를 활용한 검증

- QAOA의 대표적인 벤치마크 문제인 MaxCut 대상으로 연구 수행
- MaxCut은 그래프의 정점들을 두 그룹으로 나눠 서로 다른 그룹에 속하는 정점을 연결하는 간선의 수를 최대화하는 최적화 문제
- 연구진은 표준 벤치마크 라이브러리인 MQLib에서 82개의 소규모 MaxCut 문제를 선정해 QAOA 시뮬레이션 수행
- 1층 및 2층 QAOA 회로를 대상으로 최적 매개변수와 성능 데이터를 확보하고, 각 그래프의 구조적 특성과 비교

○ SCALAR의 작동 방식

- NVIDIA의 CUDA-Q 플랫폼을 활용해 다양한 그래프에 대한 QAOA 양자회로를 시뮬레이션하고 최적화된 매개변수와 성능 데이터 수집
- 그래프의 정점 수, 평균 차수, 군집계수, 색칠수(chromatic number), 최대 독립집합 비율 등 다양한 구조적 특성을 데이터베이스화
- 이후 그래프 이론 기반의 자동 추측 생성 도구인 txGraffiti를 활용해 그래프 특성과 QAOA 동작 사이의 수학적 관계를 탐색
- 생성된 추측을 LLM이 해석·평가하고, 반복적으로 나타나는 패턴이나 추측에서 벗어나는 사례를 분석해 다음 실험을 설계
- 특히 기존 가설에 맞지 않는 데이터도 제거하지 않고 새로운 구조적 패턴을 발견하기 위한 정보로 활용하는 것이 특징

○ 그래프 구조를 통해 QAOA 매개변수 예측 가능성 확인

- 일부 소규모·저심도(low-depth) QAOA 회로에서 그래프의 기본적인 구조적 특성이 유사하면 최적 QAOA 매개변수도 거의 동일하게 나타나는 경향을 확인
- 4개의 주요 그래프 특성인 정점 수, 평균 차수, 평균 군집계수, 최대 독립집합 비율을 활용해 그래프의 구조적 ‘지문(fingerprint)’을 구성
- 동일한 구조적 지문을 가진 그래프들을 그룹화한 결과, 벤치마크 데이터에서 14개 그룹을 확인했으며 이 중 13개 그룹에서 1층 및 2층 QAOA의 최적 설정이 거의 동일하게 나타남

- 이는 문제마다 처음부터 최적 매개변수를 탐색하는 대신, 구조가 유사한 문제에서 기존에 검증된 매개변수를 재사용할 수 있는 가능성 제시

○ 다만 단순한 그래프 특성만으로는 한계 존재

- 14개 정점으로 구성된 특정 그래프 그룹에서는 기본적인 구조적 특성이 유사했음에도 최적 QAOA 매개변수가 서로 다르게 나타나는 사례 확인
- 이는 그래프의 크기, 밀도, 군집 정도 등 단순한 지표만으로는 양자 알고리즘의 모든 동작 특성을 설명하기 어렵다는 것을 의미
- 연구진은 연결이 얼마나 균등하게 분포하는지 등 보다 세밀한 그래프 구조를 반영하는 추가 지표를 적용했으며, 일부 1층 QAOA 회로에서 예측 가능성이 향상됨을 확인
- 반면 회로의 깊이가 증가할수록 최적 매개변수의 예측 가능성이 낮아져, 심층 양자회로일수록 보다 정교하고 전역적인 문제 구조 정보가 필요한 것으로 분석

○ 다양한 그래프에서 패턴의 일반화 가능성 검증

- Barabási-Albert, Watts-Strogatz, Erdős-Rényi, 정규 그래프 등 서로 다른 네트워크 구조를 갖는 무작위 그래프를 추가 생성 분석
- 초기 벤치마크에서는 구조적 지문이 동일한 그래프에서 유사한 QAOA 설정이 나타나는 비율이 높았으나, 다양한 그래프로 범위를 확대하자 동일한 패턴은 약 절반 정도의 경우에만 확인
- 이는 특정 벤치마크 데이터에서는 강하게 나타나는 패턴이 모든 그래프 유형에 동일하게 적용되는 것은 아님을 의미
- SCALAR가 현재 단계에서는 모든 양자 알고리즘에 적용되는 범용적인 예측 도구라기보다, 특정 문제와 저심도 회로에서 유용한 구조적 패턴을 찾아내는 연구 프레임워크에 가깝다는 점을 시사

○ 실제 양자컴퓨팅 적용을 위한 가능성

- 실제 양자컴퓨터에서 QAOA 매개변수를 최적화하려면 양자회로를 반

복 실행하고 측정하는 과정이 필요해 시간과 자원이 많이 소요

- 문제의 구조적 특성을 바탕으로 유망한 매개변수를 사전에 예측할 수 있다면, 양자 하드웨어에서 필요한 반복 실행 횟수를 줄여 실험 비용과 시간을 절감할 수 있을 것으로 기대
- 이는 현재 큐비트 수와 실행 시간이 제한적이고 오류에 취약한 NISQ(현재 세대 양자컴퓨터) 환경에서 특히 의미가 있음
- 궁극적으로 AI가 양자회로의 동작을 단순히 최적화하는 것을 넘어, 어떤 문제 구조가 특정 양자 알고리즘의 성능을 결정하는지 설명하고 새로운 가설을 제시하는 역할을 할 가능성을 보여줌

○ 연구의 한계 및 향후 발전 방향

- 현재 연구는 유한한 데이터셋과 비가중 MaxCut 문제, 특정 최적화 설정을 대상으로 수행된 경험적 연구로, 발견된 패턴이 항상 성립한다는 수학적 증명은 이루어지지 않음
- Nelder-Mead와 같은 최적화 알고리즘이 전역 최적값이 아닌 국소 최적값을 찾을 가능성도 있어, 일부 패턴이 실제 양자 알고리즘의 특성인지 최적화 과정의 결과인지 추가 검증 필요
- LLM 역시 추측을 해석하고 우선순위를 정하는 역할을 수행하지만, 현재는 연구자가 어떤 그래프 특성을 사용할지 결정하고 생성된 추측의 의미를 판단하는 등 인간의 전문지식에 의존
- 향후 SCALAR가 발견한 추측을 Lean 4와 같은 형식 검증 시스템으로 연결해 경험적 패턴을 수학적으로 증명하는 연구가 가능할 것으로 전망
- 향후 다양한 최적화 문제, 가중 그래프, 더 깊은 양자회로 및 실제 양자 하드웨어를 대상으로 연구를 확대할 경우 AI 기반 양자 알고리즘 자동화 및 최적화 기술 발전에 기여할 것으로 기대

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2026/07/01/researchers-use-ai-to-make-quantum-circuit-tuning-less-trial-and-error/>